

## Themenbereiche

- **E-Bike, Pedelec**
- **Motorersatzschaltbild**
- **Motorkennlinien**
- **Reichweitenberechnung**
- **Tiefsetzsteller**

## Inhaltsverzeichnis

2 Vergleich Energiespeicher Akku und Diesel.....	2
3 Akku in einem Pedelec.....	3
4 Funktionsprinzip Elektromotor.....	4
5 E-Bike-Motor (9P).....	5
6 Reichweitenberechnung Pedelec 1.....	6
7 Abi-Musteraufgabe: Testfahrt mit dem Pedelec.....	7
8 Kennlinien Motor.....	9
9 E-Bike.....	10
10 Weitere mögliche Aufgabenstellungen zur Aufgabe 8.....	11
11 Elektroroller.....	13
12 MOSFET in einer E-Bike-Steuerung.....	15
13 Transistorbrückenschaltung.....	16
14 Tiefsetzsteller für energiesparende LED-Beleuchtung.....	16
15 Tiefsetzsteller.....	16
16 Motorsteuerung in Biogasanlage.....	17
17 Selbstfahrendes Transportsystem.....	17

## 1 Vergleich Energiespeicher Akku und Diesel

$$1.1 \quad m_{\text{Diesel}} = \frac{63 \text{ kWh}}{0,235 \cdot 11,8 \text{ kWh/Kg}} = 22,7 \text{ Kg}$$

$$m_{\text{Diesel}} = \frac{63 \text{ kWh}}{0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,13 \text{ kWh/Kg}} = 537 \text{ Kg}$$

1.2 Anforderungen (mind. 5 ) an Akkumulatoren in Fahrzeugen:

- hohe Energiedichte zur Ermöglichung großer Reichweiten
- hohes Leistungsvermögen zur Anpassung an unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten
- guter Ladewirkungsgrad, möglichst verbunden mit einer Schnellladefähigkeit
- ausreichende mechanische Stabilität
- Belastbarkeit bezüglich hoher und tiefer Temperaturen
- lange Lebensdauer

1.3 Mind. 2 Vorteile von Li-ION-Akkus gegenüber älteren Akkuarten.

- kein Memory Effekt
- keine Verwendung toxischer Substanzen
- kleiner und leichter wie vergleichbare Ni-MH Zellen
- derzeit bis zu 1000 Ladezyklen
- Verwendung preislich unkritischer Rohstoffe

1.4 Mindestens 2 Probleme bei Li-ION-Akkus:

- extreme Empfindlichkeit gegenüber Überladung,
- mögliche Selbstzündung bei zu starker/schneller Entladung/Ladung
- empfindlich gegenüber Tiefentladung,
- momentan noch zu teuer

$$1.5 \quad W_{\text{Tank}} = 80 \text{ L} \cdot 0,85 \frac{\text{Kg}}{\text{L}} \cdot 11,8 \frac{\text{kWh}}{\text{Kg}} = 802,4 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{Nutz}} = 802,4 \text{ kWh} \cdot 0,235 = 188,6 \text{ kWh}$$

$$1.6 \quad P_{\text{Rüssel}} = \frac{802,4 \text{ kWh}}{3 \text{ min}} = \frac{802,4 \text{ kWh}}{3/60 \text{ h}} = 16,05 \text{ MW}$$

$$1.7 \quad W_{\text{elektr}} = \frac{W_{\text{Nutz}}}{\eta} = \frac{188,6 \text{ kWh}}{0,95 \cdot 0,95} = 209 \text{ kWh}$$

$$1.8 \quad P_{\text{elektr}} = \frac{209 \text{ kWh}}{3/60 \text{ h}} = 4,18 \text{ MW}$$

$$1.9 \quad P_{\text{Schuko}} = 230 \text{ V} \cdot 16 \text{ A} = 3,68 \text{ kW} \quad \text{Anzahl}_{\text{Schuko}} = \frac{4,18 \text{ MW}}{3,68 \text{ kW}} = 1136 \text{ Stück}$$

$$1.10 \quad W_{80} = 209 \text{ kWh} \cdot 0,8 = 167,2 \text{ kWh}$$

$$P_{\text{Drehstrom-Haushalt}} = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 16 \text{ A} = 11,09 \text{ kW} \rightarrow t = \frac{167,2 \text{ kWh}}{11,09 \text{ kW}} = 15,1 \text{ h}$$

$$P_{\text{Drehstrom-Baukran 1}} = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 32 \text{ A} = 22,17 \text{ kW} \rightarrow t = \frac{167,2 \text{ kWh}}{22,17 \text{ kW}} = 7,54 \text{ h}$$

$$P_{\text{Drehstrom-Baukran 2}} = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 63 \text{ A} = 43,65 \text{ kW} \rightarrow t = \frac{167,2 \text{ kWh}}{43,65 \text{ kW}} = 3,83 \text{ h}$$

## 2 Akku in einem Pedelec

$$2.1 \text{ Reihenschaltung}_{\text{proStrang}} = \frac{48 \text{ V}}{3,7 \text{ V}} = 13 \text{ Stück} \quad \text{Parallelstränge} = \frac{39}{13} = 3$$

$$2.2 \quad Q_{1\text{Zelle}} = \frac{6,6 \text{ Ah}}{39} = 169 \text{ mAh}$$

$$2.3 \quad P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot \frac{v}{U} \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot 25 \frac{1000 \text{ m}/3600 \text{ s}}{2 \text{ m}} \cdot 10 \text{ Nm} = 218,2 \text{ W}$$

$$P_{\text{Motor-mech}} = 218,2 \text{ W} \cdot 0,43 = 93,8 \text{ W} \quad P_{\text{Motor-elekt}} = \frac{93,8 \text{ W}}{0,92} = 101,96 \text{ W}$$

$$W_{\text{Akku-ab}} = 317 \text{ Wh} \cdot 0,9 = 285,3 \text{ Wh}$$

$$\text{Fahrzeit: } t = \frac{W_{\text{Akku-ab}}}{P_{\text{Motor-elekt}}} = \frac{285,3 \text{ Wh}}{101,96 \text{ W}} = 2,8 \text{ h}$$

$$\text{Reichweite: } s = v \cdot t = 25 \text{ km/h} \cdot 2,8 \text{ h} = 70 \text{ km}$$

$$2.4 \quad P = 2 \cdot \pi \cdot \frac{v}{U} \cdot M \rightarrow v = \frac{P \cdot U}{2 \cdot \pi \cdot M} = \frac{(125 \text{ W} + 250 \text{ W}) \cdot 2 \text{ m}}{2 \cdot \pi \cdot 21,6 \text{ Nm}} = 5,53 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 19,9 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$2.5 \quad P_{\text{Motor-elekt}} = \frac{250 \text{ W}}{0,92} = 271,7 \text{ W}$$

$$t = \frac{W_{\text{Akku-ab}}}{P_{\text{Motor-elekt}}} = \frac{285,3 \text{ Wh}}{271,7 \text{ W}} = 1,05 \text{ h}$$

$$\text{Reichweite: } s = v \cdot t = 19,9 \text{ km/h} \cdot 1,05 \text{ h} = 21 \text{ km}$$

$$2.6 \quad t = \frac{s}{v} = \frac{105 \text{ km}}{25 \text{ km/h}} = 4,2 \text{ h} \quad P_{\text{Motor-elekt}} = \frac{W_{\text{Akku-ab}}}{t} = \frac{48 \text{ V} \cdot 8,8 \text{ Ah} \cdot 0,9}{4,2 \text{ h}} = 90,5 \text{ W}$$

$$P_{\text{Motor-mech}} = 90,5 \text{ W} \cdot 0,92 = 83,2 \text{ W} \quad P_{\text{mech-25km/h}} = 218,2 \text{ W} \text{ siehe 2.3}$$

$$\text{Motorunterstützung} = \frac{83,2 \text{ W}}{218,2 \text{ W}} \cdot 100\% = 38,1\%$$

$$P_{\text{Mensch}} = 218,2 \text{ W} - 83,2 \text{ W} = 135 \text{ W}$$

$$2.7 \text{ Umgerechnete Akkukosten: } \frac{600 \text{ €}}{1200 \cdot 70 \text{ km}} = 0,00714 \frac{\text{€}}{\text{km}} = 0,714 \frac{\text{€}}{100 \text{ km}}$$

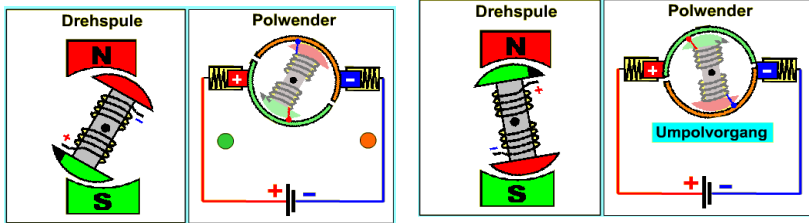
$$\text{Stromkosten: } \frac{0,32 \text{ kWh}}{0,9 \cdot 0,9 \cdot 70 \text{ km}} \cdot 0,25 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 0,00141 \frac{\text{€}}{\text{km}} = 0,141 \frac{\text{€}}{100 \text{ km}}$$

Gesamtkosten: 86 Cent pro 100 km

2.8 Verbrauchskosten: 9 € pro 100 km. Zehnmal soviel die die Pedelec-Kosten inkl. Akku!

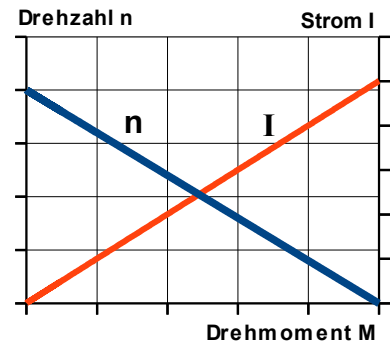
### 3 Funktionsprinzip Elektromotor

2P 3.1 Gleichnamige des Stators und des Rotors stoßen sich ab → Drehbewegung. Sobald sich ungleichnamige Pole gegenüberstehen, muss eine Umpolung erfolgen, sonst würde der Motor in der Position „ungleichnamige Pole stehen einander gegenüber“ stehen bleiben

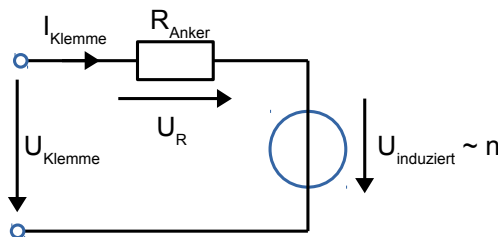


2P 3.2 bürstenloser Motor → Der Rotor benötigt keine Stromzuführung über Schleifkontakte (Bürsten), elektronisch kommutiert → die Umpolung des Stroms und damit der Magnetfelder geschieht nicht mechanisch mit Schleifringen sondern mit Transistorschaltern, außenliegender Rotor → das drehbare Teil des Motors liegt außen, Rekuperation → Beim Bremsen arbeitet der Motor als Generator und gewinnt Energie zurück, die im Akku gespeichert wird.

2P 3.3 Markieren Sie in den nebenstehenden Motorkennlinien die Punkte "Leerlauf" → Drehmoment 0 (links), Strom = 0 "Anlauf" → Drehmoment maximal (rechts), Drehzahl 0.



3P 3.4 Motorersatzschaltbild



$n = 0 \rightarrow U_{ind} = 0 \rightarrow I$  maximal da nur von Ranker begrenzt  
 $I_{max} = U_{Klemme} / R_{Anker}$

$n \uparrow \rightarrow U_{ind} \uparrow \rightarrow U_R \downarrow \rightarrow I \downarrow$

#### 4 E-Bike-Motor (9P)

Nennbetrieb:  $U_{\text{Nenn}} = 36\text{V}$ ,  $P_{\text{nenn-elektrisch}} = 250\text{W}$ ,  $M_{\text{Nenn}} = 10\text{ Nm}$ ,  $\eta_{\text{Nenn}} = 84\%$ ,  
 $n_{\text{Nenn}} = 3,348 \frac{1}{\text{s}}$  entspricht  $v = 25 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  bei einem Radumfang von 2,074m.

Die mechanischen Verluste des Motors bleiben unberücksichtigt.

$$4.1 \quad I_{\text{Nenn}} = \frac{P_{\text{Nenn}}}{U_{\text{Nenn}}} = \frac{250\text{ W}}{36\text{ V}} = 6,944\text{ A}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}}$$

$$\rightarrow P_{\text{ab}} = \eta \cdot P_{\text{zu}} = 0,84 \cdot 250\text{ W} = 210\text{ W}$$

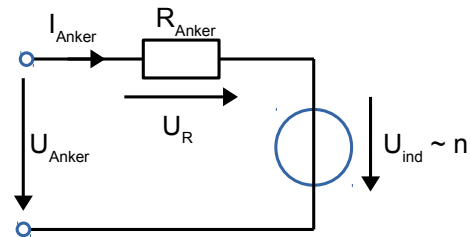
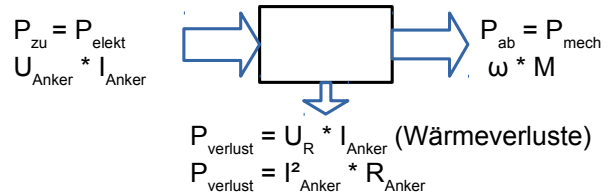
$$P_{\text{Verlust}} = 250\text{ W} - 210\text{ W} = 40\text{ W}$$

$$P_{\text{Verlust}} = I^2 \cdot R_{\text{Anker}}$$

$$\rightarrow R_{\text{Anker}} = \frac{P_{\text{Verlust}}}{I^2} = \frac{40\text{ W}}{(6,944\text{ A})^2} = 0,8296\ \Omega$$

$$U_{\text{R}} = R \cdot I = 0,8296\ \Omega \cdot 6,944\text{ A} = 5,76\text{ V}$$

$$U_{\text{ind}} = U_{\text{Anker}} - U_{\text{R}} = 36\text{ V} - 5,76\text{ V} = 30,24\text{ V}$$



4.2 Abgelesen:  $M = 8,2\text{ Nm}$  (bei  $v = 20\text{ km/h}$  und 0% Steigung)

$$\frac{M}{I} = \text{konst} = \frac{M_2}{I_2} \rightarrow I_2 = M_2 \cdot \frac{I_{\text{Nenn}}}{M_{\text{Nenn}}} = 8,2\text{ Nm} \cdot \frac{6,99\text{ A}}{10\text{ Nm}} = 5,694\text{ A}$$

$$4.3 \quad n_2 = \frac{20 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{2,074\text{ m}} = \frac{20 \frac{1000\text{ m}}{3600\text{ s}}}{2,074\text{ m}} = 2,679 \frac{1}{\text{s}}$$

$$\frac{U_{\text{ind}}}{n} = \text{konst} = \frac{U_{\text{ind}2}}{n_2} \rightarrow U_{\text{ind}2} = \frac{U_{\text{ind}}}{n} \cdot n_2 = \frac{30,24\text{ V}}{3,348 \frac{1}{\text{s}}} \cdot 2,679 \frac{1}{\text{s}} = 24,19\text{ V}$$

$$U_{\text{R}} = R_{\text{Anker}} \cdot I = 4,726\text{ V}$$

$$U_{\text{Anker}} = U_{\text{R}} + U_{\text{ind}} = 4,726\text{ V} + 24,19\text{ V} = 28,92\text{ V}$$

$$4.4 \quad P_{\text{zu}} = U_{\text{Anker}} \cdot 5,694\text{ A} = 165\text{ W}$$

$$P_{\text{ab}} = P_{\text{mech}} = 2 \cdot \pi \cdot 2,679 \cdot 8,2\text{ Nm} = 138\text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{138\text{ W}}{165\text{ W}} = 83,6\% \quad \text{hat sich leicht geändert.}$$

## 5 Reichweitenberechnung Pedelec 1

Ein Pedelec-Fahrer fährt zuerst mit  $v = 25 \text{ km/h}$  auf der Ebene eine Strecke von  $s = 40 \text{ km}$  mit einer Motorunterstützung von 25 % (Motor 25 %, Mensch 75 %).

Anschließend schaltet er auf Motorunterstützung 50 % und fährt mit  $15 \text{ km/h}$  eine  $10 \text{ km}$  lange Bergstrecke mit 8 % Steigung hoch.

Vor der Fahrt hat er seinen  $280 \text{ Wh}$ -Akku voll aufgeladen.

Rechnen Sie in allen Fällen mit einem Wirkungsgrad des Motors von 80 %.

- 5.1 Berechnen Sie, ob die gespeicherte Energiemenge zur Bewältigung der Strecke ausreichend ist. Verwenden Sie die Kennlinienschar  $P(v)$ .

Ebene:

Abgelesen:  $P = 212 \text{ W}$ , davon 25 %:  $P_{\text{motor}} = 53 \text{ W} \rightarrow P_{\text{elekt}} = 53 \text{ W}/0,8 = 66,25 \text{ W}$

$t = s/v = 40 \text{ km} / 25 \text{ km/h} = 1,6 \text{ h}$

$W = P \cdot t = 66,25 \text{ W} \cdot 1,6 \text{ h} = 106 \text{ Wh}$  (Ebene)

Berg:

Abgelesen:  $P = 410 \text{ W}$ , davon 50 %:  $P_{\text{motor}} = 205 \text{ W} \rightarrow P_{\text{elekt}} = 205 \text{ W}/0,8 = 256,25 \text{ W}$

$t = s/v = 10 \text{ km} / 15 \text{ km/h} = 0,667 \text{ h}$

$W = P \cdot t = 256,25 \text{ W} \cdot 0,667 \text{ h} = 170,9 \text{ Wh}$  (Berg)

Gesamt:

$W_{\text{ges}} = 106 \text{ Wh} + 170,9 \text{ Wh} = 276,9 \text{ Wh} < 280 \text{ Wh}$  Energiemenge reicht aus.

- 5.2 Stufe 10%:  $P = \frac{212 \text{ W} \cdot 0,1}{0,8} = 26,5 \text{ W}$   $t = 1,6 \text{ h}$  s.o.

$\rightarrow W = 26,5 \text{ W} \cdot 1,6 \text{ h} = 42,4 \text{ Wh}$  wenn er  $25 \text{ km/h}$  fährt.

## 6 Abi-Musteraufgabe: Testfahrt mit dem Pedelec

1P 6.1 Abgelesen:  $P = 350 \text{ W}$

1P 6.2  $P_{\text{elekt}} = \frac{350 \text{ W} \cdot 0,6}{0,8} = 262,5 \text{ W}$

3P 6.3 **Fragestellungen zur Vertiefung:**

Je größer der Anstieg, desto größer die notwendige Leistung, da nun zusätzlich die Hangabtriebskraft überwunden werden muss.

Der exponentielle Anstieg der Kurven mit der Geschwindigkeit wird durch den Luftwiderstand hervorgerufen.

Bestimmen Sie den Luftwiderstandsbeiwert des Radfahrers ( $F_{\text{Luftwiderstand}} = 32,7 \text{ N}$ ,  $A_{\text{Radfahrer}} = 0,9 \text{ m}^2$ ). Bewerten Sie Ihr Ergebnis anhand der Übersicht „Widerstandsbeiwert verschiedener Körper“ in der Formelsammlung. Antworten fehlen noch

### Energie im Akku

1P 6.4  $W = U \cdot I \cdot t = 36 \text{ V} \cdot 2 \text{ A} \cdot 4 \text{ h} = 288 \text{ Wh}$

2P 6.5  $t = \frac{20 \text{ km}}{25 \text{ km/h}} = 0,8 \text{ h}$   $W_{\text{verbraucht}} = 262,5 \text{ W} \cdot 0,8 \text{ h} = 210 \text{ Wh}$

$$W_{\text{verbleibend}} = W_{\text{akku}} - W_{\text{verbraucht}} = 78 \text{ Wh}$$

### Bergfahrt - zweite Etappe

2P 6.6  $\text{Unterstützung} = \frac{400 \text{ W}}{500 \text{ W}} = 80 \%$

Abgelesen:  $v = 15,3 \text{ km/h}$  bei  $500 \text{ W}$  und  $10 \%$  Steigung

4P 6.7 Der Motor gibt nur  $400 \text{ W}$  ab!  $\rightarrow P_{\text{elekt}} = \frac{400 \text{ W}}{0,8} = 500 \text{ W}$

$$\text{Zeit bis der Akku leer ist: } t = \frac{W}{P} = \frac{78 \text{ Wh}}{500 \text{ W}} = 0,156 \text{ h}$$

Während dieser Zeit zurückgelegter Weg:  $s = v \cdot t = 15,3 \text{ km/h} \cdot 0,156 \text{ h} = 2,39 \text{ km}$

$$\text{Steigung} = \tan \alpha = \frac{\text{Höhenmeter}}{\text{zurück gelegte Strecke}}$$

$$\rightarrow \text{Höhe} = 10 \cdot \frac{1}{100} \cdot 2,39 \text{ km} = 239 \text{ hm}$$

2P 6.8 Abgelesen  $v = 12,3 \text{ km/h}$  bei  $400 \text{ W}$  und  $10 \%$  Steigung,  $P_{\text{elekt}} = 500 \text{ W}$  s.o.

$$t = \frac{W}{P} = \frac{78 \text{ Wh}}{500 \text{ W}} = 0,156 \text{ h}$$

Gleiche Zeit wie oben, jedoch fehlen hier die  $100 \text{ W}$  des Fahrers, dadurch bewegt sich das E-Bike langsamer und legt in der gleichen Zeit weniger Strecke zurück:

$$s = v \cdot t = 12,3 \text{ km/h} \cdot 0,156 \text{ h} = 1,92 \text{ km}$$

$$\text{Höhe} = 10 \cdot \frac{1}{100} \cdot 1,92 \text{ km} = 192 \text{ hm}$$

3P 6.9 Zwei Fahrer (gleiche Gesamtmasse) befinden sich im Wettstreit. Zu Beginn der zweiten

Bergetappe steht beiden eine Akkuladung von 80 Wh zur Verfügung. Es gewinnt, wer nach 2 h die meisten Höhenmeter hat. Welche Geschwindigkeit ist optimal, um den Wettbewerb zu gewinnen?

Ohne Tretunterstützung: so langsam fahren, dass die 80 Wh genau für 2 h reichen!

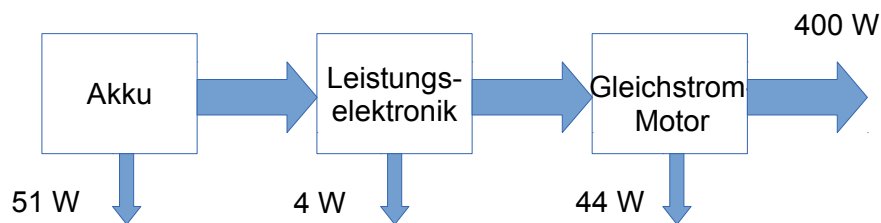
Dann kann der Mensch die größte Energiemenge beitragen, da er 2 h lang 100 W liefert.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{80 \text{ Wh}}{2 \text{ h}} = 40 \text{ W} \rightarrow P_{\text{mech}} = 32 \text{ W}$$

$$P_{\text{ges}} = 132 \text{ W} \rightarrow \text{abgelesen } v = 4 \text{ km/h} \rightarrow s = 4 \text{ km/h} \cdot 2 \text{ h} = 8 \text{ km}$$

$$\rightarrow \text{Höhe} = 10 \cdot \frac{1}{100} \cdot 8 \text{ km} = 800 \text{ hm} \quad 200 \text{ hm vor dem Ziel ist der Akku leer.}$$

### Energieflussdiagramm (weitere Vertiefung)



Das Energieflussdiagramm zeigt, wie sich der Gesamtwirkungsgrad von 80 % bei einer mechanischen Leistung des Antriebs von 400 W zusammensetzt.

6.10 Berechnen Sie die Teilwirkungsgrade von Akku, Leistungselektronik und Gleichstrommotor. Nennen Sie die maßgeblichen Eigenschaften dieser Komponenten, welche die Teilwirkungsgrade beeinflussen.

$$P_{\text{Motor-elekt}} = 400 \text{ W} + 44 \text{ W} = 444 \text{ W} \quad \eta_{\text{Motor}} = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{400 \text{ W}}{444 \text{ W}} = 0,9$$

$$P_{\text{Akku-ab}} = 444 \text{ W} + 4 \text{ W} = 448 \text{ W} \quad \eta_{\text{Elektronik}} = \frac{444 \text{ W}}{448 \text{ W}} = 0,991$$

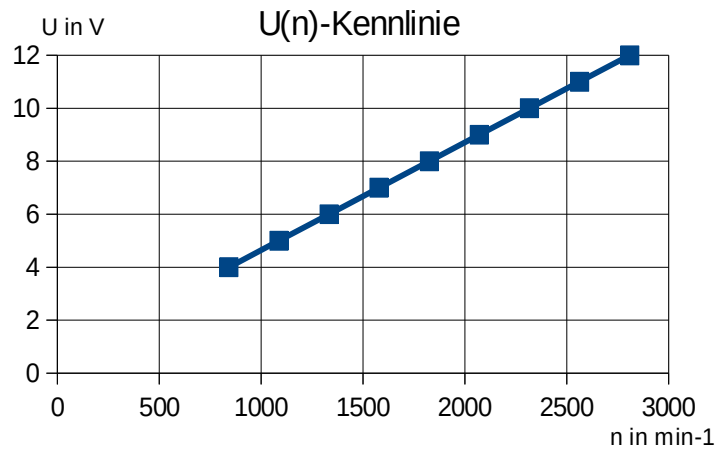
$$P_{\text{Akku-zu}} = 448 \text{ W} + 51 \text{ W} = 499 \text{ W} \quad \eta_{\text{Akku}} = \frac{448 \text{ W}}{499 \text{ W}} = 0,898$$



## 7 Kennlinien Motor

7.1 U (n)-Kennlinie im Leerlauf.

7.2 Versuchsbeschreibung:  
 12 V Klemmenspannung einstellen  
 Motor nicht belasten, Drehzahl mit  
 Drehzahlmesser feststellen  
 Motor mit Wirbelstrombremse  
 belasten, Drehmoment feststellen,  
 Drehzahl messen.  
 Usw. bei unterschiedlichen  
 Belastungen messen



7.3 Da Drehzahl und Geschwindigkeit über den Radumfang gekoppelt sind

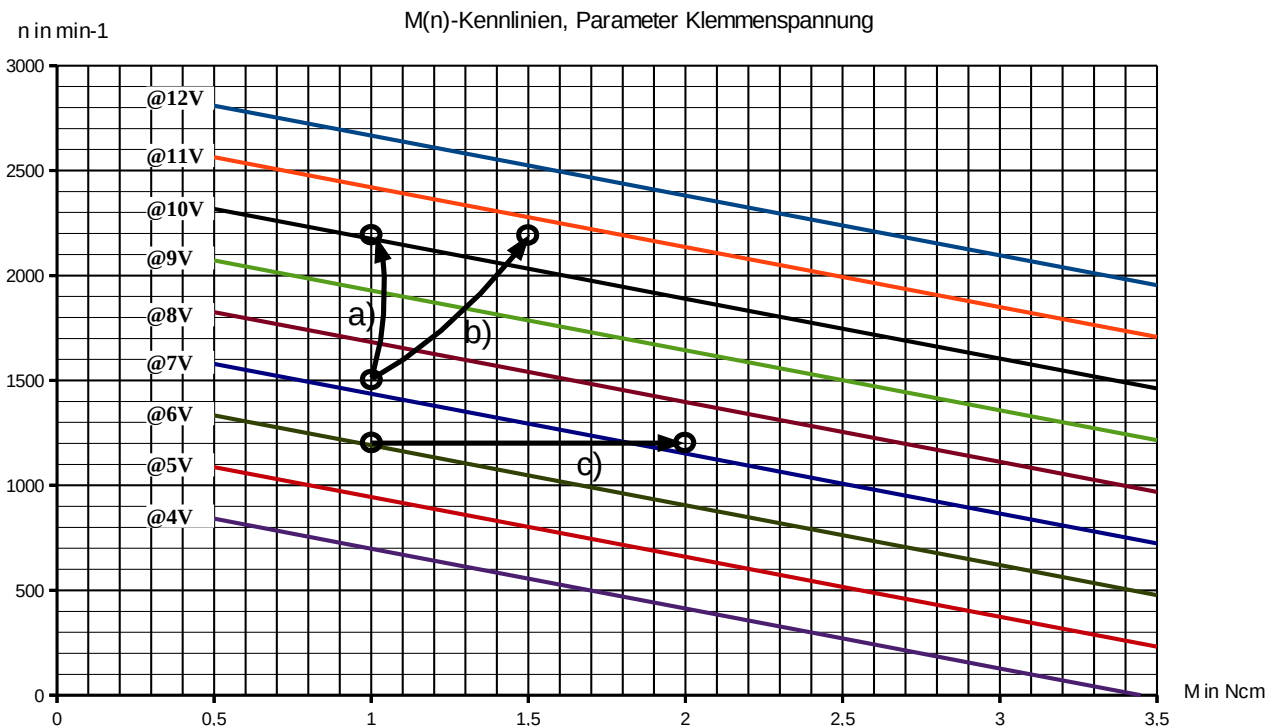
$$n = \frac{v}{\text{Radumfang}}, \text{ kann man die}$$

Drehzahl-Achse in eine Fortbewegungs-Geschwindigkeitsachse umrechnen solange sich das Übersetzungsverhältnis z.B. durch ein Getriebe nicht ändert.

7.4 Betriebspunkt 1 Ncm / 1500 min<sup>-1</sup>

Wunsch schneller zu fahren → Spannung erhöhen → ohne Gegenwind würde sich das Drehmoment zur Beschleunigung leicht erhöhen, aber beim Erreichen des Endpunkts wieder genauso groß sein wie zu Beginn (Weg a)

Da sich aber die Luftwiderstandskraft erhöht und damit das notwendige Drehmoment, erhält man einen Übergang wie bei b) gezeichnet.



7.5 Betriebspunkt 1 Ncm / 1200 min<sup>-1</sup> → gleichbleibende Geschwindigkeit, daher n = konst, aber erhöhte Hangabtriebskraft → erhöhtes Drehmoment → Übergang c)

Auch hier muss die Motorspannung erhöht werden.

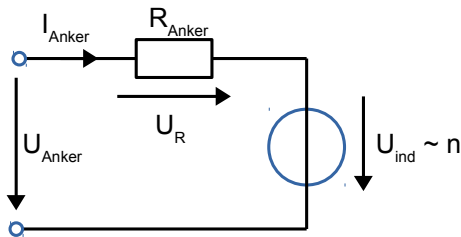
## 8 E-Bike

$$8.1 \quad n = 160 \frac{1}{\text{min}} = 2,667 \frac{1}{\text{s}} \quad v = 20 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 5,556 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

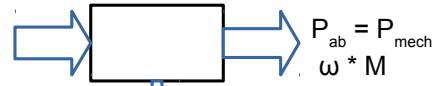
$$\text{Radumfang} = \frac{v}{n} = \frac{5,556 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2,667 \frac{1}{\text{s}}} = 2,08 \text{ m}$$

8.2 bei  $U_{\text{Anker}} = 36 \text{ V}$  und  $n = 160 \text{ U/min}$  abgelesen:  $M = 16,2 \text{ Nm}$

8.3 Ersatzschalbild des Motors      Energieflussdiagramm mit Berechnungsformeln



$$P_{\text{zu}} = P_{\text{elekt}} \\ U_{\text{Anker}} \cdot I_{\text{Anker}}$$



$$P_{\text{verlust}} = U_R \cdot I_{\text{Anker}} \quad (\text{Wärmeverluste}) \\ P_{\text{verlust}} = I_{\text{Anker}}^2 \cdot R_{\text{Anker}}$$

$$P_{\text{Mech}} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot \frac{160}{60 \text{ s}} \cdot 16,2 \text{ Nm} = 271,4 \text{ W}$$

$$P_{\text{elektr}} = \frac{P_{\text{mech}}}{\eta} = \frac{271,4 \text{ W}}{0,9} = 301,6 \text{ W} = U \cdot I$$

$$P_{\text{Verlust}} = 310,6 \text{ W} - 271,4 \text{ W} = 30,2 \text{ W}$$

$$I = \frac{P_{\text{elektr}}}{U} = \frac{301,6 \text{ W}}{36 \text{ V}} = 8,378 \text{ A}$$

$$P_{\text{Verlust}} = U_R \cdot I = R \cdot I^2 \rightarrow R = \frac{P_{\text{Verlust}}}{I^2} = \frac{30,2 \text{ W}}{(8,378 \text{ A})^2} = 0,43 \Omega$$

$$\text{Alternative: } U_R = \frac{P_{\text{Verlust}}}{I} = \frac{30,2 \text{ W}}{8,378 \text{ A}} = 3,61 \text{ V} \quad R = \frac{U_R}{I} = \frac{3,61 \text{ V}}{8,378 \text{ A}} = 0,43 \Omega$$

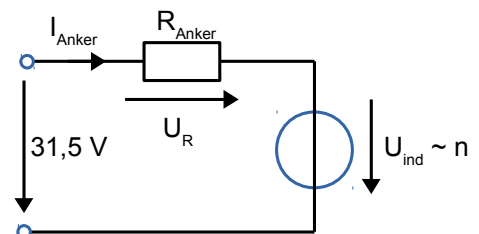
8.4  $v = 20 \text{ km/h}$  ( $\rightarrow n = 160 \text{ U/min}$  siehe Aufgabentext) und  $M = 21 \text{ Nm}$  liegt oberhalb der  $36 \text{ V}$ -Kennlinie. Dies ist mit einem  $36 \text{ V}$ -Akku nicht möglich.  
 Bei Tretunterstützung wird weniger Drehmoment vom Motor benötigt, laut  $36 \text{ V}$ -Kennlinie sind max. ca.  $16,3 \text{ Nm}$  bei  $n = 160 \text{ U/min}$  vom Motor möglich.

$$8.5 \quad 50 \% \text{ Tretunterstützung: } M_{\text{Motor}} = \frac{21 \text{ Nm}}{2} = 10,5 \text{ Nm}$$

Betriebspunkt  $M = 10,5 \text{ Nm}$  und  $n = 160 \text{ U/min}$ :  
 liegt etwas über der  $31 \text{ V}$ -Kennlinie  
 $\rightarrow U = 31,5 \text{ V}$  notwendig

$$P_{\text{Mech}} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot \frac{160}{60 \text{ s}} \cdot 10,5 \text{ Nm} = 176 \text{ W}$$

$$P_{\text{elektr}} = \frac{176 \text{ W}}{0,9} = 195 \text{ W} = U \cdot I$$



$$I = \frac{P_{\text{elektr}}}{U} = \frac{195 \text{ W}}{31,5 \text{ V}} = 6,2 \text{ A}$$

$$P_{\text{ab}} = U_{\text{ind}} \cdot I \rightarrow U_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{ab}}}{I} = \frac{176 \text{ W}}{6,2 \text{ A}} = 28,4 \text{ V}$$

$$\frac{U_{\text{ind}}}{n} = \frac{28,4 \text{ V}}{160/60 \text{ s}} = 10,6 \text{ Vs}$$

8.6  $P_{\text{elektr}} = \frac{67 \text{ W}}{0,9} = 74,4 \text{ W}$  bei 20 km/h

$$\rightarrow t_{20} = \frac{W}{P} = \frac{380 \text{ Wh}}{74,4 \text{ W}} = 5,1 \text{ h} \rightarrow s = v \cdot t = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 5,1 \text{ h} = 102 \text{ km}$$

$$P_{\text{elektr}} = \frac{87 \text{ W}}{0,9} = 96,7 \text{ W}$$
 bei 25 km/h

$$\rightarrow t_{25} = \frac{W}{P} = \frac{380 \text{ Wh}}{96,7 \text{ W}} = 3,9 \text{ h} \rightarrow s = v \cdot t = 25 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 3,9 \text{ h} = 97,5 \text{ km}$$

Der langsamere E-Biker kommt etwas weiter, allerdings braucht er viel mehr Zeit.  
 Der schnellere E-Biker muss „kräftiger“ treten, für ihn ist es während der kürzeren Zeit anstrengender (97 W statt 74 W)

## 9 Weitere mögliche Aufgabenstellungen zur Aufgabe 8

9.1 8,2 Nm; 6,7 Nm; 26,2 Nm

9.2 29,5 V / 25,2 V

9.3 20 V / 27,8 V

9.4 24,5 V; 33,5 V

9.5 0 W / 68,7 W; 42 W / 82,3 W

9.6  $n = 100 \frac{U}{\text{min}}$  Unterstützung: 50%

$$\text{Spannung: Tastgrad} = \frac{t_i}{T} = \frac{U_{\text{Mittel}}}{U_{\text{max}}} \rightarrow U_{\text{Mittel}} = \frac{t_i}{T} \cdot U_{\text{Max}} = \frac{4 \text{ ms}}{6 \text{ ms}} \cdot 36 \text{ V} = 24 \text{ V}$$

9.7 Drehmoment ablesen:  $M_{\text{abgelesen}} = 12 \text{ Nm}$

mit 50% Unterstützung:  $M = 2 \cdot M_{\text{abgelesen}} = 2 \cdot 12 \text{ Nm} = 24 \text{ Nm}$

Geschwindigkeit bei  $n = 100 \frac{U}{\text{min}}$  ermitteln:

$$v = \omega \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r \rightarrow v_1 = 2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot r \text{ und } v_2 = 2 \cdot \pi \cdot n_2 \cdot r$$

$$\rightarrow \frac{v_1}{n_1} = \frac{v_2}{n_2} \text{ aus vorheriger Aufgabe: } v = 15 \frac{\text{km}}{\text{h}} \text{ bei } n = 120 \frac{U}{\text{min}}$$

$$v_2 = \frac{v_1 \cdot n_2}{n_1} = 15 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{100 \frac{U}{\text{min}}}{120 \frac{U}{\text{min}}} = 12,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Maximale Steigung aus Diagramm bei  $M = 24 \text{ Nm}$  und  $v = 12,5 \frac{\text{km}}{\text{h}} \Rightarrow \text{max } 5,5 \%$

9.8 bei  $v = 5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  Steigung = 8% Unterstützung = 50%  $\eta = 0,9$

nötiges Drehmoment aus Schaubild abgelesen:  $M = 31 \text{ Nm}$

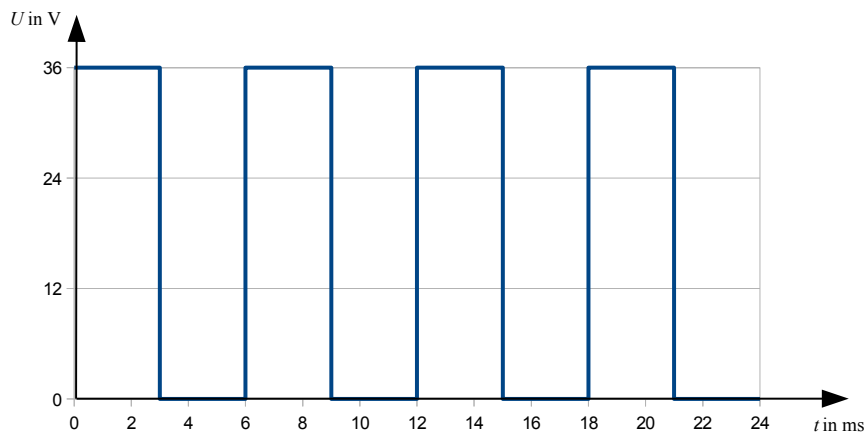
mit 50% Unterstützung:  $M_{\text{Motor}} = 15,5 \text{ Nm}$

Drehzahl bei  $v = 5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  ermitteln:  $v = \omega \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r \rightarrow v_1 = 2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot r \quad v_2 = 2 \cdot \pi \cdot n_2 \cdot r$

$\rightarrow \frac{v_1}{n_1} = \frac{v_2}{n_2}$  aus vorheriger Aufgabe:  $v = 15 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  bei  $n = 120 \frac{\text{U}}{\text{min}}$

$$n_2 = \frac{v_2}{v_1} \cdot n_1 = \frac{5 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{15 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \cdot 120 \frac{\text{U}}{\text{min}} = 40 \frac{\text{U}}{\text{min}} \quad \text{Spannung ablesen: } U_{\text{Anker}} = 18 \text{ V}$$

9.9 Tastgrad  $= \frac{t_i}{T} = \frac{U_{\text{Mittel}}}{U_{\text{max}}} \rightarrow t_i = \frac{U_{\text{mittel}}}{U_{\text{max}}} \cdot T = \frac{18 \text{ V}}{36 \text{ V}} \cdot 6 \text{ ms} = 3 \text{ ms}$



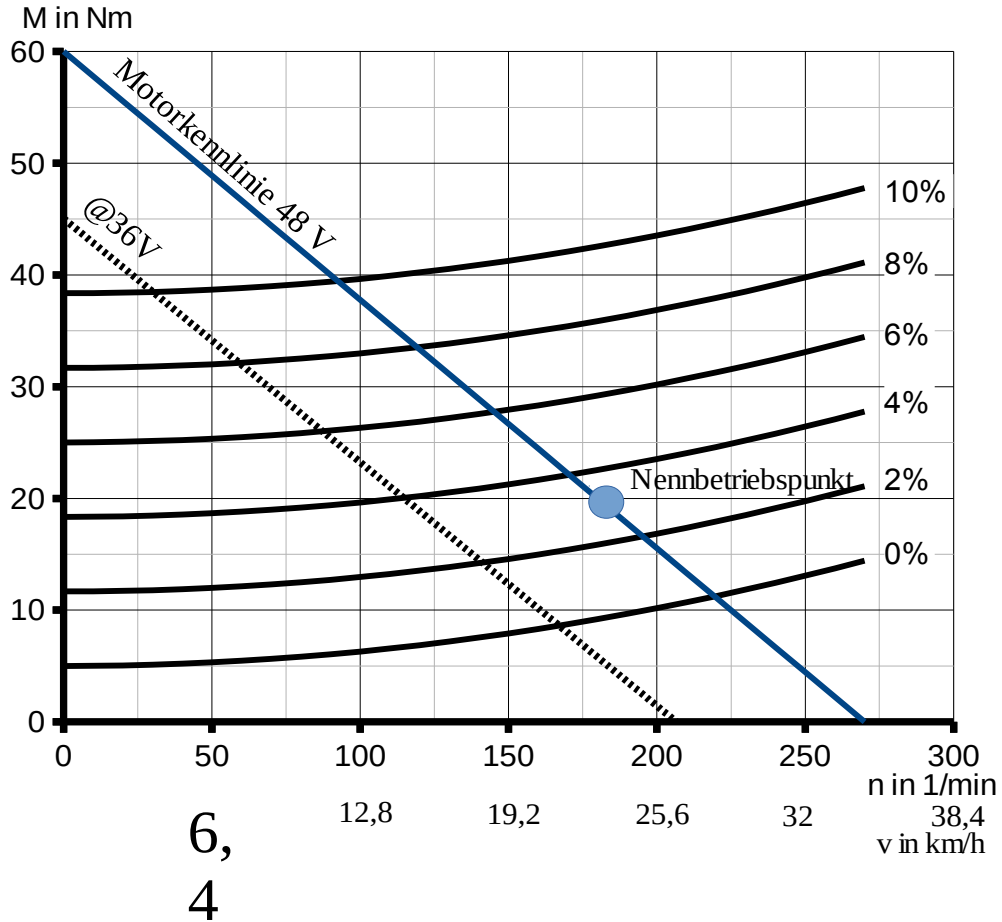
9.10  $P_{ab} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot \frac{40 \frac{1}{\text{min}}}{60 \frac{\text{min}}{\text{s}}} \cdot 15,5 \text{ Nm} = 64,93 \text{ W}$

$$P_{el} = \frac{P_{ab}}{\eta} = \frac{64,93 \text{ W}}{0,9} = 72,14 \text{ W}$$

$$P_{el} = U_{\text{Anker}} \cdot I_{\text{Anker}} \rightarrow I_{\text{Anker}} = \frac{P_{el}}{U_{\text{Anker}}} = \frac{72,14 \text{ W}}{18 \text{ V}} = 4,01 \text{ A}$$

## 10 Elektroroller

Motorkennlinie  $M(n)$  und Fahrkennlinien bei verschiedenen Steigungen in %



- 10.1 Leerlaufdrehzahl  $n_0 = 270$  U/min (bei  $M = 0$ )  
 Anlaufmoment des Motors  $M_A = 60$  Nm (bei  $n = 0$ )

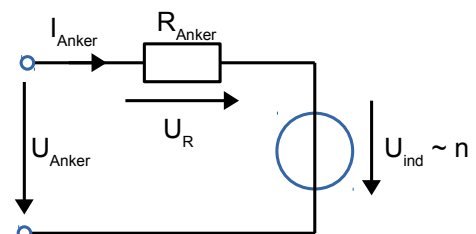
- 10.2 s. Diagramm: Die Kennlinie verläuft parallel zur bekannten 48 V-Motorkennlinie

Der Schnittpunkt mit n-Achse (Leerlauf) ergibt sich aus folgenden Überlegungen:

Im Leerlauf ist  $I_{\text{Anker}} = 0$ , daher gilt dort  $U_{\text{ind}} = U_{\text{Anker}}$

$$\frac{U_{\text{ind}}}{n} = \text{konst} \rightarrow \text{im Leerlauf: } \frac{U_{\text{Anker}}}{n} = \text{konst}$$

$$\frac{U_{\text{Anker 48}}}{n_{48}} = \frac{U_{\text{Anker 36}}}{n_{36}} \rightarrow n_{36} = \frac{U_{\text{Anker 36}} \cdot n_{48}}{U_{\text{Anker 48}}} = \frac{36 \text{ V} \cdot 270 \frac{1}{\text{min}}}{48 \text{ V}} = 202,5 \frac{1}{\text{min}}$$



Alternative: Ähnlich kann man mit dem Drehmoment beim Anfahren ( $n=0$ ) argumentieren:

$$\frac{M_{\text{ab}}}{I_{\text{Anker}}} = \text{konst} \quad \text{Beim Anfahren ist } n=0, \text{ damit ist } U_{\text{ind}}=0, \text{ damit gilt } U_{\text{Anker}} = R_{\text{Anker}} \cdot I$$

Wenn  $U_{\text{Anker}}$  um  $\frac{1}{4}$  reduziert wird, reduziert sich auch  $I_{\text{Anker}}$  um  $\frac{1}{4}$  ( $R_{\text{Anker}} = \text{konstant}$ )

Wenn  $U_{\text{Anker}}$  sich um  $\frac{1}{4}$  reduziert, reduziert sich auch  $M$  um  $\frac{1}{4}$   $\frac{M_{ab1}}{I_{\text{Anker1}}} = \frac{M_{ab2}}{I_{\text{Anker2}}}$

Damit reduziert sich  $M$  von 60 Nm auf 45 Nm. Die 36V-Kennlinie beginnt also bei 45 Nm parallel zur eingezeichneten 48V-Kennlinie.

10.3  $n = \frac{v}{U} \rightarrow$  bei 100 1/min:  $v = n \cdot U = 100 \cdot \frac{1}{\text{min}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,34 \text{ m}$

$$v = 100 \cdot \frac{60}{h} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,34 \frac{\text{km}}{1000} = 12,8 \frac{\text{km}}{h} \quad \text{Doppeltes } n \rightarrow \text{doppeltes } v, \text{ usw.}$$

10.4 Abgelesen Schnittpunkt Motorkennlinie und 0 %-Kurve:  $n = 220 \text{ 1/min}$

$$v = 220 \cdot \frac{60}{h} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,34 \frac{\text{km}}{1000} = 28,2 \frac{\text{km}}{h} \quad \text{Ebene: } v = 28,2 \text{ km/h}$$

10.5 Abgelesen Schnittpunkt Motorkennlinie und 4 %-Kurve:  $n = 170 \text{ 1/min}$

$$v = 28,2 \text{ km/h} \cdot \frac{170}{220} = 21,8 \text{ km/h}$$

10.6 Abgelesen:  $n = 180 \text{ 1/min}$  und  $M = 20 \text{ Nm}$

$$P_{\text{Mech}} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot \frac{180}{60 \text{ s}} \cdot 20 \text{ Nm} = 377 \text{ W}$$

$$P_{\text{elektr}} = \frac{377 \text{ W}}{0,85} = 444 \text{ W}$$

10.7  $P = U_{\text{Anker}} \cdot I \rightarrow I = \frac{P_{\text{elektr}}}{U_{\text{Anker}}} = \frac{444 \text{ W}}{48 \text{ V}} = 9,25 \text{ A}$

$$P_{\text{Verlust}} = P_{\text{elektr}} - P_{\text{Mech}} = 444 \text{ W} - 377 \text{ W} = 67 \text{ W}$$

$$P_{\text{Verlust}} = I^2 \cdot R_{\text{Anker}} \rightarrow R_{\text{Anker}} = \frac{P_{\text{Verlust}}}{I^2} = \frac{67 \text{ W}}{(9,25 \text{ A})^2} = 0,783 \Omega$$

10.8 Die Spannung wird ein- und ausgeschaltet. Das Verhältnis von Einschaltzeit und Periodendauer legt den Mittelwert der Motorspannung fest.

10.9  $\frac{M_{ab}}{I_{\text{Anker}}} = \text{konst}$  Beim Anfahren ist  $n=0$ , damit ist  $U_{\text{ind}}=0$ , damit gilt  $U_{\text{Anker}} = R_{\text{Anker}} \cdot I$

$$\frac{M_{ab1}}{I_{\text{Anker1}}} = \frac{M_{ab2}}{I_{\text{Anker2}}} \rightarrow I_{\text{Anker2}} = \frac{M_{ab2}}{M_{ab1}} \cdot I_{\text{Anker1}}$$

Wenn  $M_{ab}$  halbiert wird, halbiert sich auch  $I_{\text{Anker}}$ .

Wenn  $I_{\text{Anker}}$  halbiert wird, halbiert sich auch  $U_{\text{Anker}}$  ( $R_{\text{Anker}}$  konstant)

Um die Spannung 48V des Akkus zu halbieren benötigt man einen Tastgrad von  $g = 50 \%$

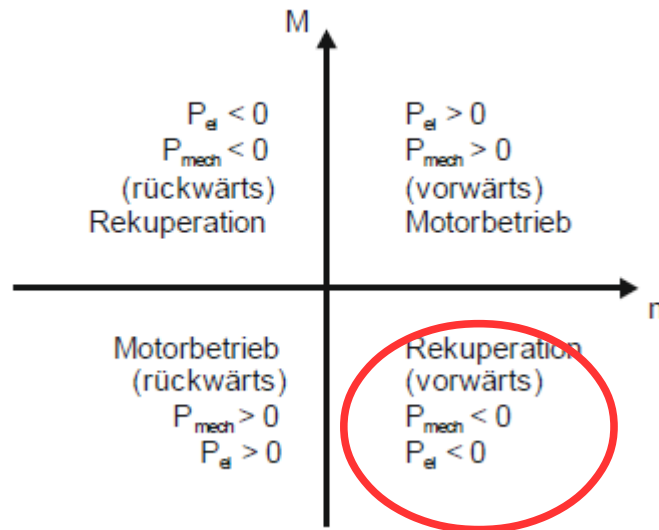
10.10  $n = 180 \text{ 1/min} \rightarrow v = 180 \cdot \frac{60}{h} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,34 \frac{\text{km}}{1000} = 23,1 \frac{\text{km}}{h}$

$$W_{\text{Akku}} = 48 \text{ V} \cdot 30 \text{ Ah} = 1440 \text{ Wh} \rightarrow W_{\text{elektr}} = 1440 \text{ Wh} \cdot 0,9 = 1296 \text{ Wh}$$

$$t = \frac{W}{P} = \frac{1296 \text{ Wh}}{444 \text{ W}} = 2,92 \text{ h}$$

$$s = v \cdot t = 23,1 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 2,92 \text{ h} = 67,5 \text{ km}$$

10.11



10.12  $W = 0,196 \text{ kWh}$

### 11 MOSFET in einer E-Bike-Steuerung

$$11.1 \quad R_{DS} = \frac{U_{DS}}{I_{Motor}} = \frac{0,7 \text{ V}}{6,9 \text{ A}} = 0,101 \Omega$$

$$P_{Trans} = I_{Motor}^2 \cdot R_{DS} = (7 \text{ A})^2 \cdot 0,101 \Omega = 4,95 \text{ W}$$

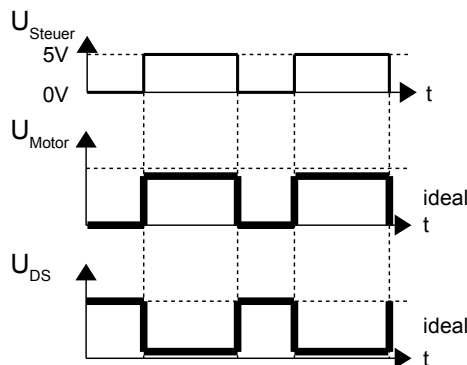
$$P_{Motor} = U_{Motor} \cdot I_{Motor} = (36 \text{ V} - 0,7 \text{ V}) \cdot 7 \text{ A} = 247 \text{ W}$$

$$11.2 \quad \eta = \frac{P_{Motor-ab}}{P_{ges}} = \frac{230 \text{ W}}{247 \text{ W} + 4,95 \text{ W}} = 91,3 \%$$

11.3 Transistor schnell ein- und ausschalten, dadurch wird der Motor so schnell ein- und ausgeschaltet, dass dieser nur den Mittelwert der Spannung „sieht“.  
 Sehr guter Wirkungsgrad, da praktisch keine Energie am Vorwiderstand verloren geht

$$11.4 \quad \frac{t_i}{T} = \frac{3}{4}$$

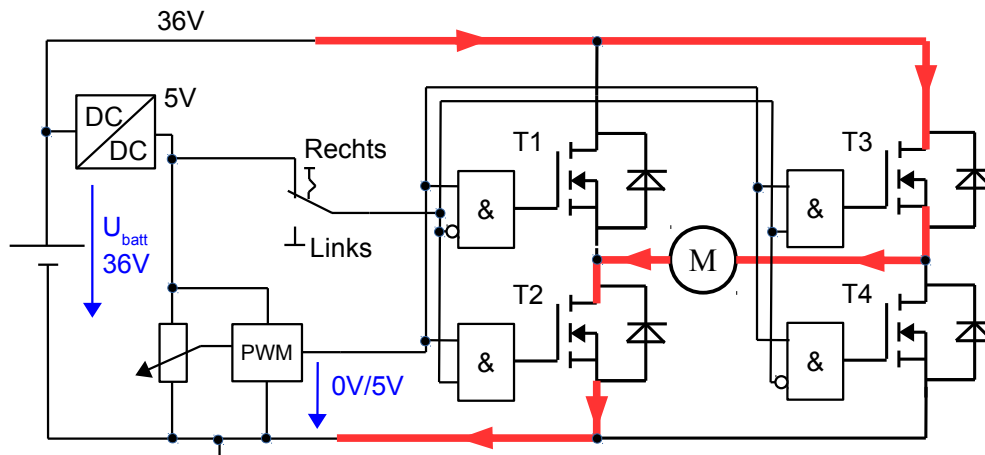
11.5



$$11.6 \quad P_{Motor} = 247 \text{ W} \cdot \frac{3}{4} = 185 \text{ W}$$

## 12 Transistorbrückenschaltung

12.1



## 13 Tiefsetzsteller für energiesparende LED-Beleuchtung

13.1  $U_{in+}$ , T, L, LED, R,  $U_{in-}$

13.2 L, LED, R, Diode, L. Spule nimmt Energie auf, wenn T leitet und gibt Energie ab, wenn T sperrt. Sie erhält den Stromfluss durch die LED aufrecht. Die Diode ermöglicht das Weiterfließen des Stromes wenn T sperrt.

13.3  $U_2$  und I.

13.4  $U_{in}$  immer konstant (= Amplitude  $U_2$ ),  $U_{LED} = 4V$  konstant,  $U_{spule}$  so, dass zu jedem Zeitpunkt gilt:  $U_2 = U_{spule} + 4V + 0,25V$

13.5 1)f, 2)r, 3)f, 4)r, 5)r, 6)f.

## 14 Tiefsetzsteller

14.1 T1 leitet:  $G1+$ , T1, L1, R1,  $G1-$ . T1 sperrt: L1, R1, T2, L1.

14.2 L1 erhält den Strom aufrecht während T1 sperrt und wirkt während dieser Zeit als Energiequelle.

14.3 abgelesen:  $\tau = 1 \text{ ms} \rightarrow R = 10 \Omega$ .

14.4 1) steiler Anstieg  $\rightarrow \tau$  kleiner  $\rightarrow L$  kleiner oder R größer.

2) höhere Frequenz, gleiches  $\tau$ .

3) höhere Frequenz, kleineres  $\tau$ : L kleiner oder R größer.



## 15 Motorsteuerung in Biogasanlage

- 15.1 Gleichspannungsmotor nicht direkt an Wechselspannung anschließbar, Spannung zu groß.
- 15.2 Gleichrichter, Glättung; PWM-Erzeugung
- 15.3 Rechtslauf: IN1=1, IN2=0, EN1=1, EN2=1, Linkslauf: IN1=0, IN2=1, EN1=1, EN2=1
- 15.4  $g = t_i / T = 10 \mu s / 40 \mu s = 0,25$ ,  $U_{\text{Mittel}} = g \cdot U = 0,25 \cdot 110 V = 27,5 V$
- 15.5 Es wird verhindert, dass beide Transistoren gleichzeitig schalten. → Kurzschlussgefahr
- 15.6 L-R in Reihe, d.h Selbstinduktionsspannung an der Spule. Strom steigt bzw. sinkt nach e-Funktion (keine Geraden)
- 15.7 abgesehen:  $T = 40 \mu s \rightarrow f = 1/T = 1/40 \mu s = 25 \text{ kHz}$
- 15.8 Nahezu konstanter Strom  $\rightarrow M \sim I \rightarrow$  konstantes Drehmoment, ohne Ruckeln
- 15.9 Nachteil Vorwiderstand: riesige Verlustleistung, Mit PWM leicht Anlauf realisierbar (Tastgrad langsam erhöhen),
- 15.10 Wechsel von Links- in Rechtslauf  $\rightarrow$  Tastgrad = 0,5  $\rightarrow$  T1&T4 und T2&T3 schalten hin und her ( $\rightarrow$  Freilaufdioden wirkungslos)
- 15.11 U abwechselnd positiv und negativ (gleich gross) mit Tastgrad = 50%

## 16 Selbstfahrendes Transportsystem

- |      |  |   |
|------|--|---|
| 16.1 | $m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{h}{x} \quad s_1 = \frac{10 m}{0,1} = 100 m \quad s_2 = \frac{10 m}{0,05} = 200 m$                   | 1 |
| 16.2 | $v = 5 \frac{km}{h} = \frac{5 \cdot 1000 m}{3600 s} = 1,389 \frac{m}{s}$   | 2 |
|      | $t_{\text{Weg}} = t_b + 2 \cdot t_{\text{Fahrtdauer}} + t_e \quad \text{mit} \quad t_{\text{Fahrtdauer}} = \frac{s}{v}$                    |   |
|      | $t_{\text{Fahrtdauer} 1} = \frac{100 m}{1,389 \frac{m}{s}} = 72 s \quad t_{\text{Fahrtdauer} 2} = \frac{200 m}{1,389 \frac{m}{s}} = 144 s$ |   |
|      | $t_{\text{Weg} 1} = 5 s + 2 \cdot 72 s + 4 s = 153 s \quad t_{\text{Weg} 2} = 5 s + 2 \cdot 144 s + 4 s = 297 s$                           |   |
| 16.3 | abgelesen $P_{\text{Antrieb}}$ bei $v = 5 \text{ km/h}$  | 1 |
|      | $P_1 = 175 W \quad P_2 = 80 W$   |   |
| 16.4 |  | 3 |
|      | $W_{\text{Weg}} = P_{\text{Steuerung}} \cdot t_{\text{Weg}} + P_{\text{Antrieb}} \cdot t_{\text{Fahrtdauer}}$                              |   |
|      | $W_1 = 4,14 Wh = 14,9 kWs \quad W_2 = 15 W \cdot 297 s + 80 W \cdot 144 s$   |   |
|      | $W_2 = 16,0 kWs$   |   |
|      | Akku- Energieinhalt $W_{\text{Akku}} = 120 Wh = 432 kWs$   |   |
|      | Anzahl der Fahrten $N = \frac{W_{\text{Akku}}}{W_{\text{Weg}}}$  |   |
|      | $N_{\text{Weg} 1} = 29 \quad N_{\text{Weg} 2} = \frac{432 kWs}{16,0 kWs} = 27$   |   |

16.5

6

Durch die Bergabfahrt verfügbare Energie

$$W_{\text{bergab}} = P_{\text{Antrieb}} * t_{\text{Fahrtdauer}} * \eta$$

$$W_{\text{bergab1}} = 175 \text{ W} * 72 \text{ s} * 0,7 = 8,82 \text{ kWs}; \quad W_{\text{bergab2}} = 80 \text{ W} * 144 \text{ s} * 0,7 = 8,06 \text{ kWs}$$

$$Q_1 = \frac{W_{\text{bergab1}}}{U_{\text{Akku}}} = \frac{8,82 \text{ kWs}}{12 \text{ V}} = 735 \text{ As} \quad Q_2 = \frac{W_{\text{bergab2}}}{U_{\text{Akku}}} = \frac{8,06 \text{ kWs}}{12 \text{ V}} = 671,7 \text{ As}$$

$$I_1 = \frac{Q_1}{t} = \frac{735 \text{ As}}{72 \text{ s}} = 10,2 \text{ A} \quad I_2 = \frac{Q_2}{t} = \frac{671,7 \text{ As}}{144 \text{ s}} = 4,66 \text{ A}$$

$$I_1 > I_{L\text{max}} \rightarrow I_{\text{rekup1}} = 5 \text{ A} \quad I_2 < I_{L\text{max}} \rightarrow I_{\text{rekup2}} = I_2$$

Einspeisbare Energie durch die Bergabfahrt

$$W_{\text{rekup}} = U * I_{\text{rekup}} * t_{\text{Fahrtdauer}}$$

$$W_{\text{rekup1}} = 12 \text{ V} * 5 \text{ A} * 72 \text{ s}$$

$$W_{\text{rekup1}} = 4,32 \text{ kWs}$$

$$W_{\text{rekup2}} = 12 \text{ V} * 4,66 \text{ A} * 144 \text{ s}$$

$$W_{\text{rekup2}} = 8,05 \text{ kWs}$$

Benötigte Energie pro Fahrt  $W_r = W_{\text{Weg}} - W_{\text{rekup}}$

$$W_{1R} = 14,9 \text{ kWs} - 4,32 \text{ kWs}$$

$$W_{1R} = 10,58 \text{ kWs}$$

$$W_{2R} = 16,0 \text{ kWs} - 8,05 \text{ kWs}$$

$$W_{2R} = 7,95 \text{ kWs}$$

Anzahl Fahrten mit Rekuperation  $N_R = \frac{W_{\text{Akku}}}{W_R}$

$$N_{1R} = \frac{432 \text{ kWs}}{10,58 \text{ kWs}} = 40,8$$

Es sind 40 Fahrten möglich

$$N_{2R} = \frac{432 \text{ kWs}}{7,95 \text{ kWs}} = 54,3$$

Es sind 54 Fahrten möglich

16.6

2

$$W_{\text{pot}} = m * g * h = 50 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} * 10 \text{ m} = 4905 \text{ Nm} = 4,905 \text{ kWs}$$

$$\eta_1 = \frac{4,90 \text{ kWs}}{10,58 \text{ kWs}} = 46,6 \%$$

$$\eta_2 = \frac{4,90 \text{ kWs}}{7,95 \text{ kWs}} = 61,6 \%$$

16.7

2

+ Schnellere Taktzeiten möglich  
 - nur ein Teil der bei der Talfahrt erzeugten Energie wird rückgespeist

+ Energieeffizienter  
 + größere Rückspeisung möglich wegen langsamerer Fahrt  
 - langsamer